

CONTRIBUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DENDROGEOMORFOLÓGICAS A LA ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA-MAGNITUD DE DESPRENDIMIENTOS

J. MOYA y J. COROMINAS

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña

RESUMEN

Para evaluar la peligrosidad de los movimientos de ladera es necesario conocer cómo varía la frecuencia temporal de los movimientos con su magnitud (tamaño). Sin embargo, la información directa sobre la ocurrencia de movimientos de ladera es habitualmente escasa. Las técnicas de dendrocronología aplicada a los procesos geomorfológicos se han mostrado eficientes en la reconstrucción de series temporales de deslizamientos. En la presente comunicación se muestra que dichas técnicas pueden ser utilizadas también para reconstruir la magnitud de los movimientos. Aplicando estas técnicas, se ha obtenido la curva de magnitud-frecuencia de los desprendimientos de uno de los canales más peligrosos del Solà d'Andorra (Andorra la Vella, Principado de Andorra).

1. INTRODUCCIÓN

El riesgo de movimientos de ladera deriva de la exposición tanto a movimientos pequeños y frecuentes como a grandes movimientos que suelen ser muy ocasionales. En la evaluación del nivel de riesgo de movimientos de ladera, uno de los principales retos con el que se encuentran las administraciones públicas es su expresión en términos de pérdidas anuales posibles. La elaboración de curvas de magnitud - frecuencia de movimientos se ha convertido en un paso fundamental para el análisis cuantitativo del riesgo (Hovius et al. 1997; Pelletier et al., 1997; Hungr et al., 1999; Guzzetti et al., 2002; Malamud et al., 2004; Picarelli et al., 2005). La peligrosidad de los movimientos de ladera y depende del mecanismo de formación y propagación. Por lo tanto, lo más adecuado es elaborar la curva de magnitud - frecuencia correspondiente a cada tipo de movimiento de ladera.

Para obtener relaciones de magnitud - frecuencia se utilizan inventarios de movimientos de ladera (Picarelli et al., 2005; Corominas y Moya, 2008). Los inventarios más fiables son los basados en observaciones directas (Douglas, 1980; Gardner, 1983) o en la recopilación sistemática de sucesos de deslizamiento por servicios técnicos (p.ej. de mantenimiento de carreteras) (Hungre et al., 1999). La magnitud de los movimientos de ladera puede ser representada bien mediante el área (Hovius et al., 1997; Pelletier et al., 1997; Guzzetti et al., 2002) bien mediante el volumen de los depósitos (Hungre et al., 1999; Guzzetti et al., 2003). El registro tiene que abarcar varias décadas para que se pueda obtener una estimación mínimamente representativa de la frecuencia y de la magnitud.

Sin embargo, las fuentes de datos sobre movimientos de ladera son escasas; los registros que pueden conseguirse por los métodos anteriores son a menudo incompletos o incluso inexistentes en muchas zonas. La falta de información temporal sobre los movimientos de ladera puede remediarse recurriendo a métodos indirectos (de datación) para reconstruir las series temporales de movimientos. La dendrocronología aplicada a los procesos geomorfológicos (o dendrogeomorfología) ha mostrado su eficacia para la reconstrucción de series temporales de movimientos de ladera (Moya y Corominas, 2005; Stoffel et al., 2005; Perret et al., 2006; Stoffel, 2006; Moya et al., 2009). Se alcanza una precisión de un año, o incluso de seis meses en circunstancias favorables (Stoffel et al., 2005; Moya et al., 2009).

Hasta ahora las técnicas dendrogeomorfológicas no se han utilizado para desarrollar curvas de magnitud – frecuencia de movimientos de ladera. En esta comunicación se presenta un ejemplo de aplicación de dichas técnicas con este fin a un tipo de movimiento de ladera, los desprendimientos. El estudio se ha llevado a cabo en un sector del Solà d'Andorra (Principado de Andorra), una ladera con alto riesgo de desprendimientos. La extensión del método a otros tipos de movimientos ha sido descrita por Corominas y Moya (2009).

2. ZONA DE ESTUDIO: EL CANAL DE LA ALZINA

El canal de la Alzina está situado en el Solà d'Andorra, una ladera rocosa que se extiende a lo largo de más de dos kilómetros en la margen derecha del valle del Gran Valira (Andorra la Vella, Principado de Andorra) (Figura 1). La máxima altitud se alcanza en el pico de Carroi (2332 m), mientras que el fondo de valle se encuentra en torno a los 980 m. Las pendientes son altas en la parte inferior de la ladera, donde pueden superarse los 60°. El sustrato rocoso está formado por un macizo granodiorítico, en el que se encuentran cinco familias de fracturas (Copons, 2004; Copons et al., 2005). El Solà d'Andorra está incidido por varios canales, que transfieren la mayoría de bloques caídos a la parte baja de la ladera, donde se acumulan formando canchales. Las cicatrices frescas de desprendimientos y las grietas abiertas son abundantes en el Solà d'Andorra, lo que evidencia la intensa actividad de caída de bloques.

En la parte más baja de la ladera se encuentra la población de Santa Coloma (Figura 1).

Durante los últimos 50 años se han observado una treintena de caídas de bloques, con volúmenes generalmente inferiores a 100 m³. El volumen individual de los bloques varía típicamente entre los 0.5 y los 25 m³. La mayoría de estos desprendimientos alcanzaron la parte baja de los canchales y se aproximaron a las edificaciones existentes. El caso más peligroso fue el ocurrido el 21 de enero de 1997, en el canal de la Alzina, en el que un bloque de 25 m³ impactó contra un edificio de viviendas causando un herido grave.

El estudio dendrogeomorfológico se ha llevado a cabo en el canchal alimentado por los desprendimientos del canal de la Alzina (Figura 1). En el canchal se encuentra un bosque denso (entre 950 y 2700 árboles por hectárea) de robles y encinas; el diámetro de los troncos es, sin embargo, pequeño, con una media de 10 cm (Moya et al. 2009).

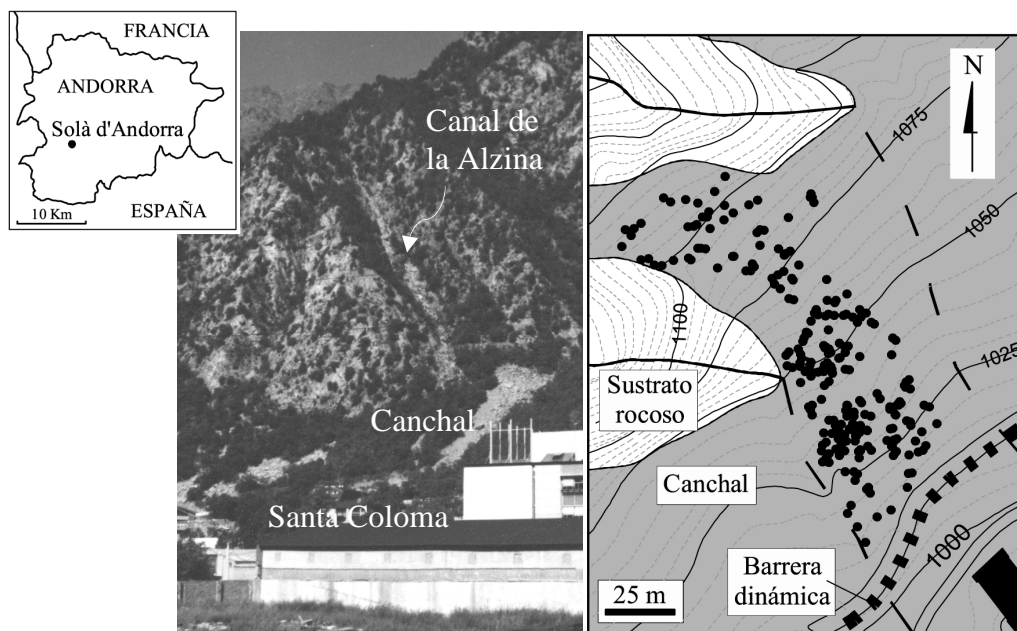


Figura 1. Localización del Solà d'Andorra, del canal de la Alzina y de los árboles muestreados en el canchal de la Alzina.

2. MÉTODOS

La determinación de la frecuencia de los desprendimientos en el canchal de la Alzina se realizó en un estudio dendrogeomorfológico anterior (Moya y Corominas, 2005). En él se describen los tipos de daños que causan los desprendimientos a los árboles y su datación (ver también, Stoffel et al., 2005; Perret et al., 2006; Stoffel, 2006 y Moya et al., 2009).

Con frecuencia se encuentran varios árboles heridos en una misma estación dendrológica (estación de crecimiento -primavera y verano- y estación de reposo -otoño e invierno-). Cabe

preguntarse si dichos árboles han sido heridos por bloques caídos en diferentes momentos durante la estación o si corresponden a un único desprendimiento formado por diversos bloques que han impactado en varios árboles (Moya et al., 2009). La mayoría de los desprendimientos observados históricamente en el Solà d'Andorra han movilizado varios bloques (Copons 2004; Copons et al., 2005; Corominas et al., 2005) (Figura 2). De acuerdo con lo anterior, hemos supuesto que las heridas de impacto producidas en una misma estación dendrológica corresponden a un mismo desprendimiento, siempre que la distribución espacial de las heridas pueda ser explicada por la trayectoria de un bloque o de varios bloques divergentes. Esto implica que caídas que ocurran en una misma estación y que tengan una trayectoria similar no pueden ser diferenciadas.

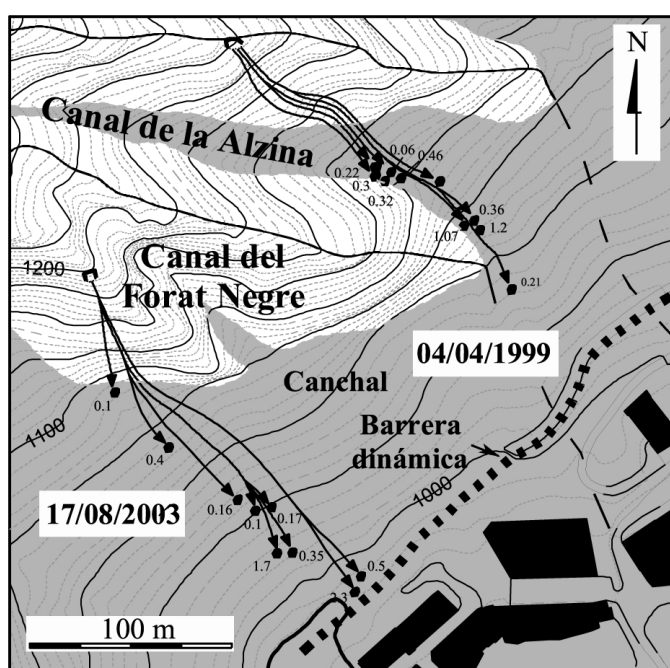


Figura 2. Localización de los bloques desprendidos (círculos negros) en dos desprendimientos recientes ocurridos en el Solà d'Andorra (se indica el volumen de los bloques en metros cúbicos). Sólo los bloques mayores a $0,1 \text{ m}^3$ son mostrados en el esquema.

En cuanto a la determinación de la magnitud de los desprendimientos, supone un reto para el análisis dendrogeomorfológico. También suele serlo para otros métodos, al menos si las caídas se repiten en el tiempo y los bloques se acumulan en una misma zona. La observación directa de desprendimientos, o una realizada pocos días después del fenómeno, tiene la gran ventaja que permite determinar el tamaño (magnitud) del movimiento con relativa facilidad. Sin embargo, en reconocimientos realizados al cabo de varios años es difícil de identificar el número de bloques caídos y el área de depósito correspondientes a cada desprendimiento. Un desprendimiento raramente deja depósitos espacialmente continuos, si no que los bloques se dispersan en la zona de acumulación. Los bloques correspondientes a diferentes caídas se

encuentran entremezclados en el canchal y son difícilmente distinguibles entre ellos. Esto constituye un serio problema para obtener la curva de magnitud - frecuencia a partir de inventarios de caídas de bloques que no estén basados en la observación directa o reciente.

Otra aproximación al problema consiste en considerar el área que envuelve a los bloques depositados por el desprendimiento como indicadora de la magnitud del mismo; área a la que podemos denominar área deposicional. Esta área habitualmente no se puede delimitar de forma directa, por las limitaciones antes comentadas. No obstante, la trayectoria seguida por cada desprendimiento puede rastrearse en un bosque considerando el número y la posición de los árboles que muestran heridas de impacto y la edad de las mismas. La localización en un mapa de los árboles dañados por un desprendimiento proporciona una estimación de la extensión del mismo, más precisa cuanto mayor sea la densidad del bosque. En lugar del área deposicional puede utilizarse el área de bosque afectado por el desprendimiento, definida por la envolvente de los árboles dañados por el mismo (de aquí en adelante Área de Árboles Dañados, o AAD) (Corominas y Moya, 2009). Esta área corresponde a la zona de tránsito y de deposición del desprendimiento en el canchal. El AAD se propone aquí como una medida de la magnitud de los desprendimientos; aunque es una medida indirecta y grosera.

En el estudio dendrogeomorfológico previo realizado en el canchal de la Alzina se muestrearon árboles con heridas de impacto en varias bandas horizontales, de hasta 25 m de anchura (Moya y Corominas, 2005). Sin embargo, para obtener el AAD no es suficiente un muestreo en bandas, si no que es necesario el muestreo de los árboles dañados en todo el canchal. Se muestrearon un total de 254 árboles entre 2002 y 2004 (Figura 1). Para cada suceso de desprendimiento identificado mediante el análisis dendrogeomorfológico se ha trazado el contorno del AAD sobre un mapa y su superficie se ha calculado con Autocad.

La aproximación a la magnitud de los desprendimientos mediante el AAD está basada en el hecho que cuanto mayor es el tamaño de un desprendimiento, mayor es el alcance del mismo (Corominas, 1996). Esta aproximación también descansa en la hipótesis que las caídas de bloques mayores movilizan un mayor número de bloques y que, entonces, tanto el área deposicional en el canchal como el área de bosque afectado son también mayores. Para sustentar esta hipótesis se ha analizado, por un lado, la relación entre el número de árboles afectados por cada desprendimiento y el alcance del mismo. Por otro lado, se han utilizado datos de diez desprendimientos inventariados en el Solà d'Andorra y se ha comparado el volumen la masa desprendida en cada evento con el área deposicional.

5. RESULTADOS

La Figura 3 muestra la serie temporal de los daños en el bosque del canchal de la Alzina. El eje vertical muestra el número de árboles heridos por estación dendrológica. Se han identificado 12 estaciones con desprendimiento. En todos los casos, la localización de los

árboles heridos en una misma estación puede explicarse por un único suceso de desprendimiento. Por lo tanto, se interpreta que 12 desprendimientos han alcanzado el canchal de la Alzina en los últimos 40 años. Este es el periodo de tiempo que abarca la datación de heridas de árboles visibles en la superficie del tronco en el Solà d'Andorra (Moya y Corominas, 2005; Moya et al., 2009).

El registro de desprendimientos puede ser incompleto, sin embargo, en la parte más antigua de este periodo (concretamente antes del año 1978-79); esto es debido a que las heridas pequeñas correspondientes a desprendimientos relativamente antiguos pueden haber desaparecido completamente de la superficie del tronco (Moya et al., 2009). La frecuencia de los desprendimientos se ha sido calculada sólo para el periodo 1979-2002 (24 años). Este intervalo es similar al utilizado en otros trabajos para la construcción de curvas de magnitud-frecuencia (Hung et al., 1999; Guzzetti et al., 2003).

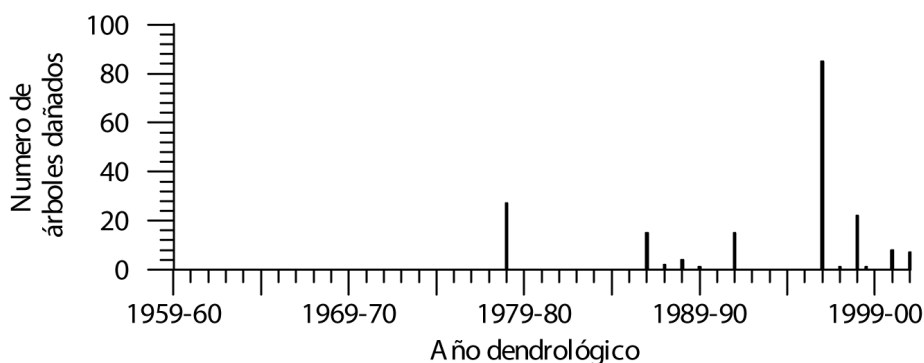


Figura 3. Serie temporal de árboles con heridas de impacto presentes en el canchal de la Alzina.

Según lo anterior, las barras verticales de la Figura 3 indican el número de árboles afectados por cada desprendimiento. Puede verse en dicha figura que sólo 5 de los 12 desprendimientos han afectado a más de una decena de árboles. El pequeño número de árboles dañado en el resto de casos sugiere que se trata de caídas de pequeño tamaño. En tres de los casos el número de árboles heridos supera la veintena; se trata de los desprendimientos ocurridos en la estación de reposo de los años 1978-79, 1996-97 y 1998-99. Estos dos últimos casos coinciden con los únicos desprendimientos notados por los habitantes de Santa Coloma, que tiene un barrio situado en la parte más baja del canchal de la Alzina. El desprendimiento de 1996-97 corresponde al ocurrido el 21 de enero de 1997, en el que tres bloques alcanzaron la zona urbana y uno de ellos (de 25 m³) impactó contra un edificio de viviendas.

El caso de 1998-99 corresponde al desprendimiento del 4 de abril de 1999, que alcanzó la parte baja del canchal aunque no llegó a tocar la zona urbana. El área afectada por este desprendimiento fue inspeccionada inmediatamente después del suceso, gracias a lo cual se conoce el volumen de la masa desprendida (unos 5 m³) y la localización en canchal de los bloques de mayor tamaño (mayores a 0.1 m³), que se muestra en la Figura 4. En esta figura se

puede ver que el área deposicional de los bloques coincide en gran medida con el área de los árboles dañados por el desprendimiento. La Figura 4 muestra también que hay varios árboles heridos que se encuentran canchal abajo de los bloques cartografiados durante el reconocimiento del suceso. Este hecho ilustra la dificultad de registrar información sobre desprendimientos recientes en laderas boscosas, como es el caso del canchal de la Alzina.

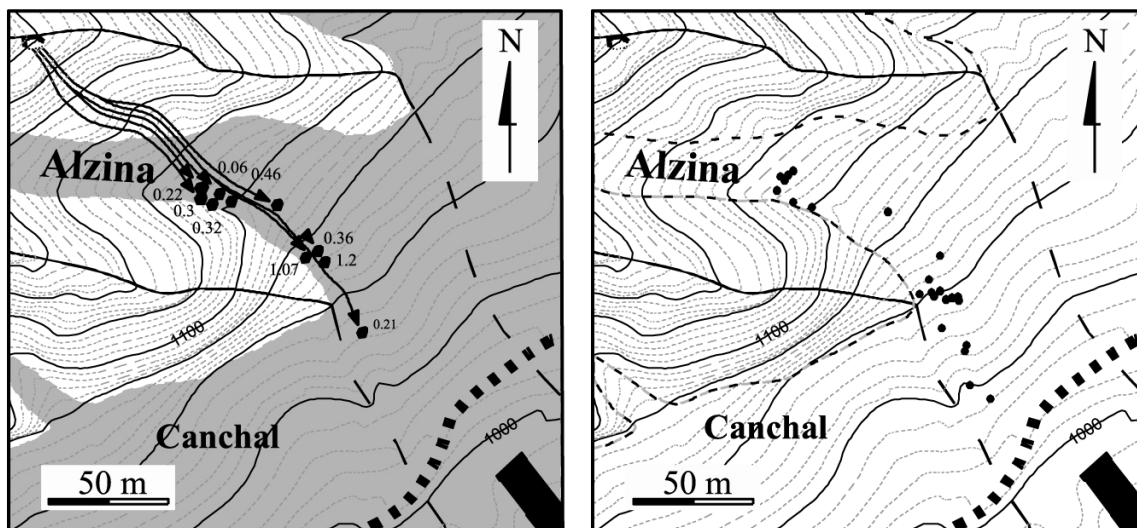


Figura 4. Mapa de localización de los bloques desprendidos del canal de la Alzina el 4 de abril de 1999 (izquierda); se indica también el volumen de los bloques (en metros cúbicos). Localización de los árboles heridos en la estación de reposo de 1998-99 (derecha). La línea gruesa discontinua de la esquina inferior derecha corresponde a una barrera dinámica construida en octubre de 1999.

La magnitud del otro desprendimiento inventariado en el canal, el del 21 de enero de 1997, no es conocida con precisión; sólo se sabe que fue superior a los 25 m^3 . Tampoco se dispone de una cartografía de los bloques depositados por este suceso. A pesar de ello, el gran alcance de este desprendimiento junto con el gran tamaño del bloque que alcanzó un edificio (25 m^3) y el gran número de árboles afectados (85), sugieren que dicho desprendimiento es el de mayor magnitud que ha ocurrido en el canal de la Alzina en los últimos 40 años.

El análisis de los 12 desprendimientos ocurridos en el canchal de la Alzina muestra que existe una relación clara entre el alcance de los bloques y el número de árboles dañados por cada desprendimiento (Figura 5). Los desprendimientos pueden agruparse en cuatro clases en función de estos dos factores, clases que pueden interpretarse en términos cualitativos de magnitud de los desprendimientos. El grupo A consiste en desprendimientos que tienen un alcance corto y que han impactado con pocos árboles. Se interpreta que este grupo corresponde a roturas de pequeña magnitud, constituidas por un bloque de tamaño pequeño o medio. Los desprendimientos del grupo B tienen un alcance grande pero afectan a pocos árboles; estos casos probablemente son caídas de uno o dos bloques de tamaño medio-grande

(del orden de algunos metros cúbicos) que siguen trayectorias paralelas. En el grupo C el alcance es grande y el número de árboles heridos es de unas pocas decenas; se consideran como desprendimientos de tamaño moderado a grande, que están compuestos por varios bloques con trayectorias divergentes. El suceso de abril de 1999 pertenece a este grupo (Figura 4); en este caso se desprendieron más de 10 bloques con tamaño individual comprendido entre 0.2 y 1.2 m³. El grupo D incluye un desprendimiento de gran alcance y que afectó casi a un centenar de árboles. Es el caso del desprendimiento sucedido en enero de 1997, que incluyó a un bloque de 25 m³, como se ha mencionado anteriormente. Se trata de un desprendimiento grande, probablemente formado por varias decenas de bloques con trayectorias divergentes que impactaron en un gran número de árboles.

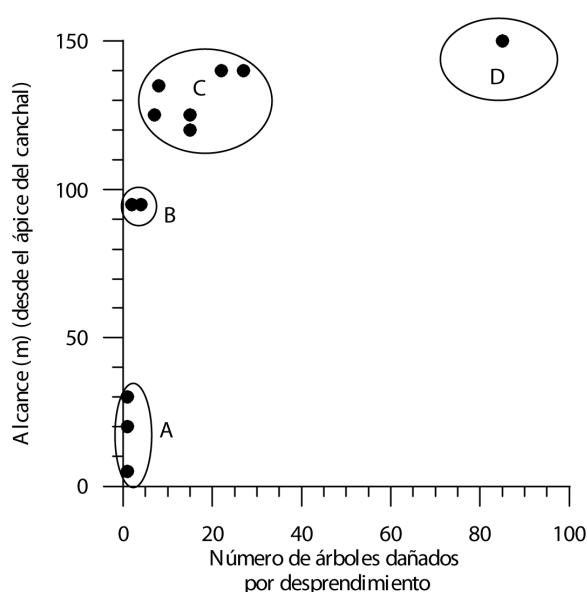


Figura 5. Número de árboles dañados en relación al alcance del desprendimiento, casos datados dendrogeomorfológicamente en el canchal de la Alzina. El alcance se ha medido desde el ápice del canchal hasta el árbol dañado más distante canchal abajo (ver explicación en el texto).

Un aspecto clave por verificar es si el área de canchal afectada por un desprendimiento puede tomarse con garantías como una medida de la magnitud del fenómeno. La relación entre el volumen de los desprendimientos y su área deposicional no ha sido investigada. Hemos analizado esta relación en diez casos del Solà d'Andorra en los que ambas variables son conocidas; se trata de eventos ocurridos en los últimos diez años (Figura 6). A pesar del pequeño número de casos disponibles y de que la dispersión para desprendimientos de pequeño volumen es notable, puede verse una tendencia clara de aumento del área deposicional con el volumen del desprendimiento. Evidentemente, una relación como la mostrada en la Figura 6 necesita más datos para ser confirmada, pero estos resultados preliminares apoyan el uso del área deposicional y de la AAD de desprendimientos para el análisis de magnitud-frecuencia.

El análisis de las Figuras 5 y 6 indica que, en el Solà d'Andorra, existe una tendencia tal que cuanto mayor es el desprendimiento (y mayor es el número de bloques implicado), mayor es su recorrido, mayor es el área afectada del canchal, mayor es el número de árboles dañados y mayor es el área definida por estos árboles (AAD). Un desprendimiento consistente en un único gran bloque (de varias decenas de metros cúbicos) puede recorrer una distancia larga en el canchal pero, en este caso, los árboles heridos definirán una trayectoria lineal y el área afectada será pequeña (Figura 7, caso del año 2001-02).

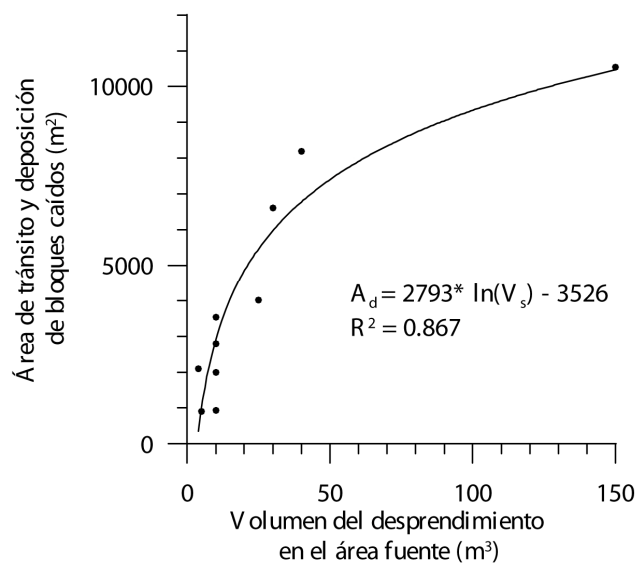


Figura 6. Área de tránsito y deposición de bloques en el canchal en relación al volumen de la masa desprendida, datos correspondientes a diez casos recientes inventariados en el Solà d'Andorra.

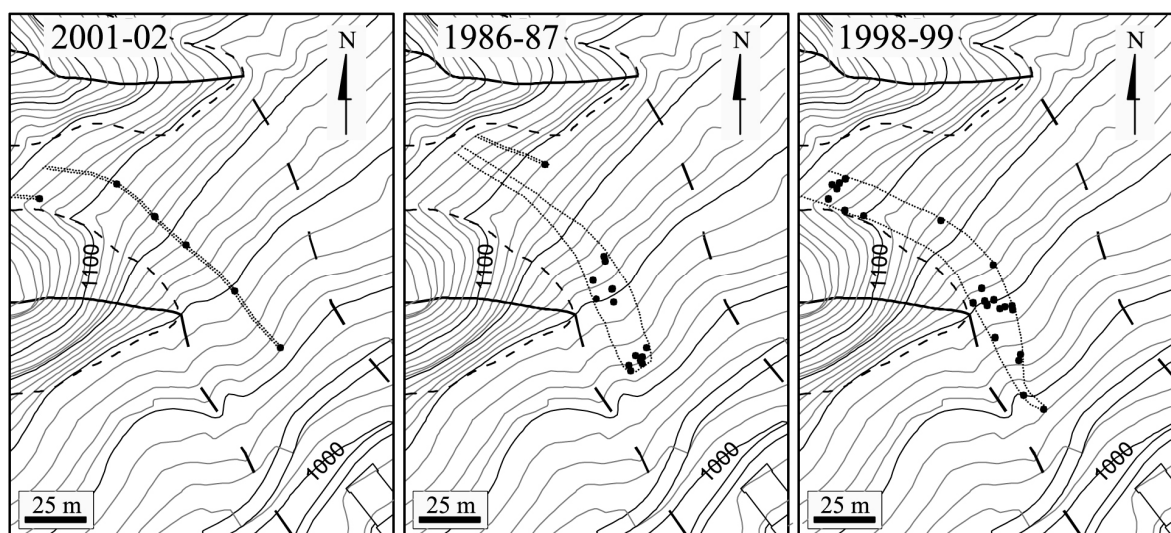


Figura 7. Área de árboles dañados correspondiente a varios desprendimientos del canchal de la Alzina. La línea de puntos delimita el AAD.

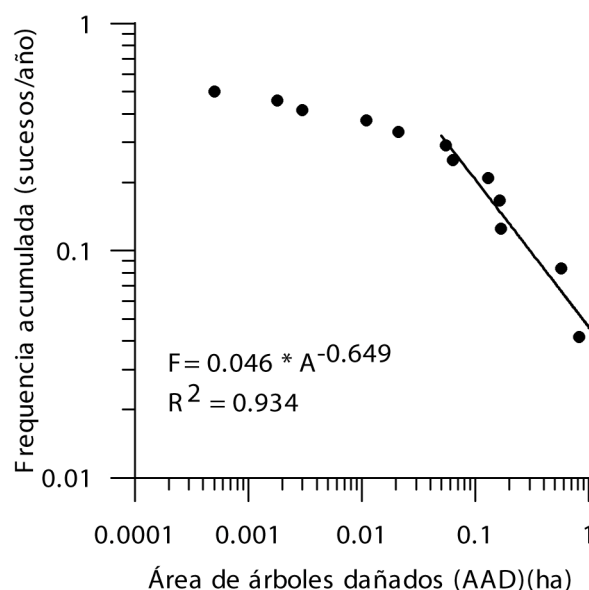


Figura 8. Área de árboles dañados (AAD) frente a la frecuencia anual acumulada de desprendimientos en el canchal de la Alzina.

La Figura 8 muestra la frecuencia anual acumulada de desprendimientos respecto a la magnitud, en términos de AAD, correspondiente al canchal de la Alzina. Ambos ejes se han definido en una escala logarítmica, puesto que la variación de la frecuencia con la magnitud del fenómeno suele expresarse en órdenes de magnitud. La relación obtenida es lineal pero sólo a partir de cierto umbral de magnitud (0,4 hectáreas). Este hecho es común en las curvas de magnitud-frecuencia acumulada de movimientos de ladera (Bunce et al., 1997; Hungr et al., 1999; Dussauge-Peisser et al., 2002; Guzzetti et al., 2003) y suele interpretarse como un efecto de la censura (falta parcial de registro) de movimientos de menor tamaño. En su inventario de desprendimientos registrados en desmontes de British Columbia (Canadá), Hungr et al. (1999) encontraron que la censura es observable para volúmenes inferiores a 1 m³. Este umbral se eleva a 50 m³ en la base de datos de Dussauge-Peisser et al. (2002).

El rango lineal de la gráfica de magnitud-frecuencia de desprendimientos del canchal de la Alzina puede ajustarse mediante una función potencial (Figura 8). Este resultado está en consonancia con lo hallado en otros trabajos sobre desprendimientos (Bunce et al., 1997; Hungr et al., 1999; Dussauge-Peisser et al., 2002; Guzzetti et al., 2003).

7. CONCLUSIONES

La frecuencia de los desprendimientos puede ser calculada a partir de los daños causados en los árboles. Se han identificado y datado 12 desprendimientos en el canchal de la Alzina, ocurridos desde el año 1978-79. La elevada densidad del bosque en este canchal permite

suponer que el registro de caídas de bloques es bastante completo. Sin embargo, el valor obtenido de la frecuencia debe considerarse un valor mínimo porque algunos desprendimientos pueden pasar desapercibidos si ocurren con una frecuencia mayor que la resolución del método de datación (que es de un semestre).

La magnitud de un desprendimiento puede estimarse a partir del área de bosque afectado por el mismo. Para ello se ha partido de la hipótesis que cuanto mayor es el volumen de la masa desprendida, mayor es el área afectada por el fenómeno en la zona de tránsito y deposición. El análisis de diez casos históricos inventariados en el Solà d'Andorra apoya tal supuesto, aunque es necesario disponer de un mayor número de casos para establecer una relación más sólida.

Con los 12 desprendimientos identificados en el canchal de la Alzina mediante técnicas dendrogeomorfológicas se ha elaborado la curva de magnitud (AAD)-frecuencia de los desprendimientos. Nuestros resultados deben verse con cautela dado el pequeño número de casos utilizados. Hay que subrayar que el intervalo temporal contemplado en la curva de magnitud-frecuencia es corto (24 años) y, aunque es similar a otras curvas publicadas, probablemente no es suficientemente largo para reflejar cambios a medio y largo plazo de la actividad de los desprendimientos, ni la frecuencia de eventos de gran magnitud (con periodo de retorno más de 50 años). Por otra parte, la curva obtenida no puede compararse estrictamente con otras presentadas en trabajos previos, que utilizan el volumen del desprendimiento como medida de su magnitud.

A pesar de las limitaciones anteriores, la curva de magnitud-frecuencia que hemos obtenido a través del análisis dendrogeomorfológico es útil para la evaluación de la peligrosidad de los desprendimientos en el canchal de la Alzina; de otro modo, dicha curva no se podría haber realizado puesto que sólo existen dos casos históricos inventariados en este canchal.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la importante contribución de Juan Pérez en el muestreo dendrogeomorfológico y en el análisis de las muestras. Esta investigación ha sido financiada por el proyecto Safeland de la Comisión Europea y por el proyecto Big Risk de la CICYT.

REFERENCIAS

- Bunce, C.M., Cruden, D.M. and Morgenstern, N.R., 1997. Assessment of the hazard from rockfall on a highway. *Canadian Geotechnical Journal*, 34: 344-356.
- Copons, R., 2004. *Avaluació de la perillositat de caigudes de blocs rocosos al Solà d'Andorra la Vella*. Tesis doctoral, Dpt. de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona.
- Copons, R., Vilaplana, J.M., Corominas, J., Altimir, J. and Amigó, J., 2005. Rockfall risk management in high density urban areas. The Andorran experience. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (Eds.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, New York, pp. 675-698.

- Corominas, J., 1996. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 33: 260-271.
- Corominas, J. and Moya, J., 2008. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102: 193-213.
- Corominas, J. and Moya, J., 2009. Contribution of dendrochronology to the development of magnitude-frequency relationships for landslides. *Geomorphology* (en revisión)
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J.M., Altimir, J. and Amigó, J., 2005. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2: 343-357.
- Douglas, G.R., 1980. Magnitude frequency study of rockfall in Co. Antrim, N. Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5: 123-129.
- Dussauge-Peisser, A., Helmstetter, C., Grasso, J.R., Hantz, D., Desvarreux, P., Jeannin, M. and Giraud, A., 2002. Probabilistic approach to rockfall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 2: 15-26.
- Gardner, J.S., 1983. Rockfall frequency and distribution in the Highwood pass area, Canadian Rocky mountains. *Zeits. für Geomorphologie*, 27: 311-324.
- Guzzetti, F., Malamud, B.D., Turcotte, D.L., and Reichenbach, P., 2002. Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 195: 169-183.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., and Wieczorek, G.F., 2003. Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 491-503.
- Hovius, N., Stark, C.P. and Allen, P.A., 1997. Sediment flux from a mountain belt derived by landslide mapping. *Geology*, 25: 231-234.
- Hungr, O., Evans, S.G., Hazzard, J., 1999. Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main transportation corridors of south-western British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal* 36: 224-238.
- Malamud, B.D., Turcotte, D.L., Guzzetti, F. and Reichenbach, P., 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 687-711.
- Moya, J. y Corominas, J., 2005. Cálculo de la frecuencia de desprendimientos mediante la dendrocronología en el Solà d'Andorra (Andorra la Vella). En Alonso, E., Corominas, J. y Hurlimann, M. (Eds.), *VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, pp. 616-627.
- Moya, J, Corominas J, Perez-Arcas J and Baeza C., 2009. Dendrogeomorphological assessment of the frequency of rockfalls for hazard analysis at the Solà d'Andorra (Andorra Principality). *Geomorphology* (en prensa).
- Pelletier, J.D., Malamud, B.D., Blodgett, T. and Turcotte, D.L., 1997. Scale-invariance of soil moisture variability and its implications for the frequency-size distribution of landslides. *Engineering Geology*, 48: 255-268.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G. and Fell, R., 2005. Hazard characterization and quantification. In O. Hungr, R. Fell, R. Couture and E. Eberhardt (editors) *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London. pp. 27-61.
- Perret S., Stoffel M. and Kienholz, H., 2006. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps - A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology*, 74:219-231.
- Stoffel, M., 2006. A review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: the role of dendrogeomorphology in natural hazard research. *Natural Hazards*, 39: 51-70.
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lievre, I., Delaloye, R., Myint, M. and Monbaron, M. 2005. Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest-a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*, 68: 224-241.